

INCLUSIÓN DE POLVOS DE MOLIENDA EN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE CON AGREGADOS RECICLADOS

Señas¹, Lilia; Priano¹, Carla; Marfil^{2,3}, Silvina

1. Ing. Civil. Dpto. de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur. e-mail: cpriano@uns.edu.ar

2. Dra. Geología. Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur. smarfil@uns.edu.ar

3. Investigador Principal CIC.

RESUMEN

Para la elaboración de un Hormigón Autocompactante (HAC) se usan los mismos agregados que para uno convencional, con la diferencia que las partículas finas gobiernan las características de autocompactabilidad del mismo. En este trabajo se estudió un HAC reemplazando 50 % del agregado grueso (canto rodado patagónico) por agregado reciclado y 20 % del agregado fino (arena natural) por polvos de molienda resultantes de la trituración de hormigón. Se evaluaron sus propiedades en estado fresco con ensayos que definen su autocompactabilidad, se determinaron propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido y se realizó un estudio petrográfico del hormigón a fin de evaluar la zona de interfase y la incidencia de los polvos de molienda en la microtextura del mortero. Los resultados obtenidos mostraron diferencias en el comportamiento del HAC con la inclusión de polvos de molienda respecto al hormigón patrón, pero aun así se demuestra que es factible la inclusión de estos finos triturados en la elaboración de hormigón autocompactante

ABSTRACT

Same aggregates are used to elaborate Self Consolidating Concrete (SCC) and conventional concrete, although self-compactability characteristics are governed by fine particles. In this work it was studied a SCC replacing 50% of the course aggregate (Patagonian gravel) with recycled aggregate and 20% of the fine aggregate (natural sand) with grinding powders of concrete trituration. Fresh concrete properties were evaluated using tests that define its self-compactability. There were also determined the physical and mechanical properties in hardened state. Finally, a petrographic study was performed to evaluate the interface zone and the influence of grinding powders in mortar microtexture. Results showed differences in the behaviour of SCC with grinding powders in respect of control concrete. Nevertheless, it is demonstrated that it is possible to include these fine grinding powders in self consolidating concrete elaboration.

INTRODUCCIÓN

El término Hormigón Autocompactante (HAC) refiere a un tipo de hormigón especial que puede fluir bajo su propio peso sin necesidad de compactación y sin que se produzca segregación de los materiales.

Para la elaboración de un HAC se usan los mismos agregados que para un Hormigón Convencional (HC), con la diferencia que las partículas finas gobiernan las características de autocompactabilidad de la mezcla fresca. Para incrementar la resistencia a la segregación de un HAC y mantener la cohesión, se requiere una gran cantidad de finos, lo cual genera una mayor demanda de agua en el hormigón debido al aumento de la superficie específica de los agregados. Este efecto se compensa por el empleo de los aditivos reductores de agua de última generación, sin los cuales no sería posible elaborar un HAC¹.

Los agregados reciclados se obtienen de la trituración de hormigón de desecho, y la fracción gruesa de áridos triturados puede ser utilizada como reemplazo del agregado grueso natural en la producción de hormigón. Los beneficios e inconvenientes del uso de agregado grueso reciclado han sido extensamente estudiados^{2, 3, 4, 5, 6}. A pesar de presentar menor densidad y mayor absorción que los agregados naturales, es factible elaborar un hormigón de buen desempeño mediante una correcta dosificación⁷.

En el proceso de trituración de agregados, queda una fracción fina remanente que puede ser incorporada en la elaboración de hormigón, para reemplazar a los agregados finos naturales⁸. Algunos autores sostienen que hasta un 30% de reemplazo no modifica sustancialmente las propiedades mecánicas del hormigón reciclado ni su comportamiento durable^{9, 10, 11}. Este efecto puede ser atribuido a una relación agua/cemento efectiva más baja del hormigón reciclado respecto al convencional y a que los agregados que provienen de la trituración de hormigón presentan partículas con forma angulosa y textura rugosa, generando una mejor interfase en la zona de transición pasta-agregado, respecto al árido natural¹¹.

Independientemente del agregado reciclado o natural, se considera que en el HAC, la microestructura de la pasta y de la zona de interfase es más densa y homogénea que en el HC, especialmente debido al uso de adiciones, eliminación de la vibración mecánica y a la disminución del volumen y tamaño del agregado grueso. Cuanto mayor es el tamaño del agregado grueso, la zona de transición es más débil. Algunos autores sostienen que el incremento de porosidad en la zona de interfase agregado-pasta de un HAC es menos pronunciada que en un HC¹². Inclusive el volumen, distribución y diámetro crítico de los poros de un HAC es similar al de un hormigón de altas prestaciones¹³.

La incorporación de adiciones minerales como filler calcáreo, ceniza volante o escoria granulada de alto horno, modifican la estructura de la zona de interfase y/o reducen su espesor¹⁴. Mediante el estudio de imágenes por SEM se analizó la microestructura del HAC y se observó que el filler calcáreo reduce la porosidad en la zona de transición, mejora la adherencia entre el agregado y la matriz y disminuye la

exudación interna¹⁵.

En este trabajo se estudió un HAC reemplazando el 50 % del agregado grueso (canto rodado patagónico) por agregado reciclado y el 20 % del agregado fino (arena natural) por polvos de molienda resultantes de la trituración del hormigón. Se evaluaron las propiedades de las mezclas en estado fresco con ensayos que definen la autocompactabilidad, se determinaron propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido y se realizó un estudio petrográfico del hormigón con la finalidad de evaluar la zona de interfase agregado-mortero y la incidencia de los polvos de molienda en la microtextura del mortero.

MATERIALES Y MEZCLAS

Para la elaboración de los diferentes pastones, se utilizaron los siguientes materiales:

Cemento pórtland normal (CPN 40) proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agua corriente tomada de la red de provisión de la ciudad de Bahía Blanca.

Y dos tipos de agregado:

- a) Natural: constituido por arena silíceas de módulo de finura 2,42 y canto rodado de tamaño máximo nominal 12,5 mm. Ambos cumplen con las especificaciones granulométricas dadas por la Norma IRAM 1627¹⁶ y provienen de un yacimiento ubicado al sur de la Provincia de Buenos Aires.
- b) Reciclado: se logró a partir de la trituración de probetas de hormigón elaborado con canto rodado proveniente de obras realizadas en la zona de Bahía Blanca. Se molió el material a reciclar con una trituradora de mandíbulas. Se separó la fracción gruesa (Figura 1a) de la fina (Figura 1b) de manera tal de obtener un agregado grueso reciclado de tamaño máximo nominal similar al canto rodado (12,5 mm) y un agregado fino reciclado con módulo de finura de 3,77.

Para completar el contenido de finos necesario en un HAC, se utilizó filler calcáreo y el polvo de molienda pasante por el tamiz de malla 0,149 mm (Nº 100) (Figura 1c), obtenido como fracción remanente en el proceso de trituración de hormigón.

Con estos materiales se dosificaron cuatro hormigones distintos de relación agua/cemento 0,50. Se utilizaron dos aditivos “experimentales”, reductores de agua de alto rango (polycarboxilatos modificados en base acuosa), denominados “S” y “H”, que dieron origen a dos grupos diferentes, de dos pastones cada uno. En ambos grupos, se trabajó con un hormigón de referencia, elaborado con canto rodado y un reemplazo del 50%, en volumen, del agregado grueso natural por reciclado (HAC 6 y HAC 7). Luego se reemplazó 20% del agregado fino natural por agregado fino reciclado (HAC 8 y HAC 9). Las denominaciones y características de cada uno de

los pastones se detallan en la Tabla 1.

PASTONES	Aditivo	Dosis	Agregado Grueso	Agregado Fino
HAC 6	S	1,20%	50% CR + 50% Rec.	Arena Natural
HAC 8	S	1,40%	50% CR + 50% Rec.	Ar. Nat. + 20% Rec.
HAC 7	H	1,30%	50% CR + 50% Rec.	Arena Natural
HAC 9	H	1,50%	50% CR + 50% Rec.	Ar. Nat. + 20% Rec.

Tabla 1 – Características de los pastones elaborados. CR: canto rodado; Ar. Nat.: arena natural; Rec.: reciclado

En la Tabla 1 se observa que con los dos aditivos utilizados, fue necesario aumentar su correspondiente dosis en los pastones en los que se incorporó la arena de trituration, para lograr un mismo ámbito de consistencia.

Debido a la cantidad y tipos de finos y a los aditivos empleados, todos los HAC requirieron un tiempo mayor de amasado que el HC para alcanzar una apropiada homogeneidad de la mezcla.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

a. Compatibilidad aditivos/cemento

Para optimizar la dosis de aditivo se debe determinar el punto de saturación para el sistema agua/cemento/aditivo y se lo evalúa con el ensayo del cono de Marsh. Una dosificación de aditivo por encima del punto de saturación no sólo no modifica la fluidez de la pasta, sino que puede causar efectos negativos (retraso de fraguado, segregación) además de encarecer notablemente el costo del hormigón¹⁷.

Se determinó el residuo sólido (IRAM 1663)¹⁸ de cada uno de los aditivos, para establecer el contenido de agua que aportan al agua de amasado. Para el aditivo “H” fue 49% y para el “S” 41 %, valores que se tuvieron en cuenta al momento de realizar la dosificación de la pastas cementicias para el ensayo con el cono de Marsh. Ambos aditivos demostraron una total compatibilidad con el cemento empleado y se puede asegurar que el tiempo de fluidez será mantenido por al menos una hora.

b. Ensayos del HAC en estado fresco

Las propiedades básicas del HAC (fluidez, resistencia a la segregación, deformabilidad en estado fresco y viscosidad) se determinaron y cuantificaron por ensayos representativos, que tienen en cuenta tanto su capacidad para llenar los espacios del encofrado como para pasar a través de obstáculos sin perder su homogeneidad ni crear obstrucciones. Se realizaron los siguientes ensayos:

. Ensayo de Extendido (ASTM C 1611-05)¹⁹: determinación de T_{50} (tiempo que tarda el hormigón en alcanzar la marca de 50 cm de diámetro) y $d_{m\acute{a}x}$ (diámetro final alcanzado por la mezcla).

. Ensayo J-Ring (ASTM C1621-06)²⁰: determinación de h_1, h_2 (alturas del hormigón en los extremos interior y exterior del anillo), T_{50} (tiempo que tarda el hormigón en alcanzar la marca de 50 cm de diámetro) y $d_{m\acute{a}x}$ (diámetro final alcanzado por la mezcla).

. Ensayo de Embudo en V (V-Funnel): determinación de T_v (tiempo que tarda en escurrir el volumen total de hormigón).

En muchos casos los aditivos reductores de agua de alto rango, pueden incluir aire en la masa de hormigón fresco, por ello se determinó su contenido mediante el aparato "Washington" (IRAM 1602)²¹.

c. Ensayos del HAC en estado endurecido

Se moldearon y curaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534)²², para realizar los ensayos mecánicos de resistencia a compresión (IRAM 1546)²³ y tracción simple por compresión diametral (IRAM 1658)²⁴.

Se realizaron probetas cilíndricas de 10 x 20 cm para el ensayo de succión capilar (IRAM 1871)²⁵ y se determinó la capacidad (C) y velocidad de succión capilar (S). La primera representa la cantidad de agua por unidad de área que es capaz de absorber la muestra bajo ensayo hasta llegar a una constancia de masa, y la segunda la rapidez a la cual el agua penetra en la estructura porosa del hormigón.

d. Estudios petrográficos

Se realizó un estudio petrográfico de todas las muestras a fin de evaluar la zona de interfase y la incidencia de los polvos de molienda en la microtextura del mortero. Se utilizó un microscopio de polarización Olympus, trinocular, con cámara de video y programas computarizados para el tratamiento de imágenes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todos los pastones elaborados se modificó notablemente la fluidez al agregar el aditivo. Cuando se reemplazó el agregado fino natural por el reciclado, se debieron incrementar las dosis propuestas por el fabricante a fin de lograr una consistencia similar a los hormigones de referencia. El agregado fino reciclado presenta textura rugosa y mayor absorción de agua que la arena natural. En el caso del aditivo S, se logró la fluidez requerida con una dosis mucho menor que la máxima recomendada por el fabricante (2% en peso del cemento), mientras que con

el aditivo H se debió utilizar la dosis máxima recomendada (1,5% en peso del cemento).

En todos los casos las mezclas presentaron buena imagen, sin signos de segregación ni exudación. En los pastones con incorporación de la fracción fina reciclada, se observó un material de aspecto más áspero y la presencia de algunas macro-burbujas de aire.

a. Ensayos del HAC en estado fresco

Los resultados de los ensayos correspondientes a los pastones estudiados, se resumen en la Tabla 2. En la Figura 1d se observa el ensayo de extendido del pastón HAC 9, la Figura 1e muestra el aspecto de la mezcla HAC 6 luego del ensayo del J-Ring y en la Figura 1f se aprecia en detalle el borde de la mezcla HAC 9 luego del ensayo de extendido.

PASTONES	Aire medido	Extendido		J-Ring			Embudo
	(%)	T ₅₀ (s)	d _{máx.} (cm)	h ₁ - h ₂ (mm)	T ₅₀ (s)	d _{máx.} (cm)	T _v (s)
HAC 6	2,5	3,9	68	10	6,1	67	9,6
HAC 8	2,0	3,9	70	15	7,8	66	12,6
HAC 7	1,5	5,9	64	15	12,3	59	9,9
HAC 9	1,0	10,5	61	20	13,8	60	14,0

Tabla 2 – Resultados de los ensayos en estado fresco

Los hormigones elaborados con el aditivo S, incorporaron mayor cantidad de aire respecto a los realizados con el H. En ambos casos, las mezclas que contenían polvo registraron menor tenor de aire incluido en comparación con el patrón.

En todos los casos estudiados, los valores presentados en la Tabla 2 se mantuvieron dentro de los límites aconsejados para los HAC por la bibliografía^{1, 26, 27} y brindan una referencia de las condiciones de autocompactibilidad de las mezclas.

Según los resultados del ensayo de extendido, todos los pastones se pueden calificar como VS2 (T₅₀ > 2 segundos); los HAC elaborados con el aditivo S como clase SF2 (660 a 750 mm) y los elaborados con H como clase SF1 (550 a 650 mm), según The European Guidelines for Self-compacting Concrete²⁷. En relación a los resultados del ensayo del embudo en V, todos los HAC califican como VF2 (T₅₀ > 8 segundos). La diferencia entre el diámetro final alcanzado en el ensayo del extendido libre y en el ensayo del J-Ring se mantiene menor o igual a 50 mm, por lo que la capacidad de pasaje se considera aceptable en todas las mezclas. La viscosidad plástica evaluada con el método del embudo en V, aumentó en los hormigones que contenían polvos de molienda.

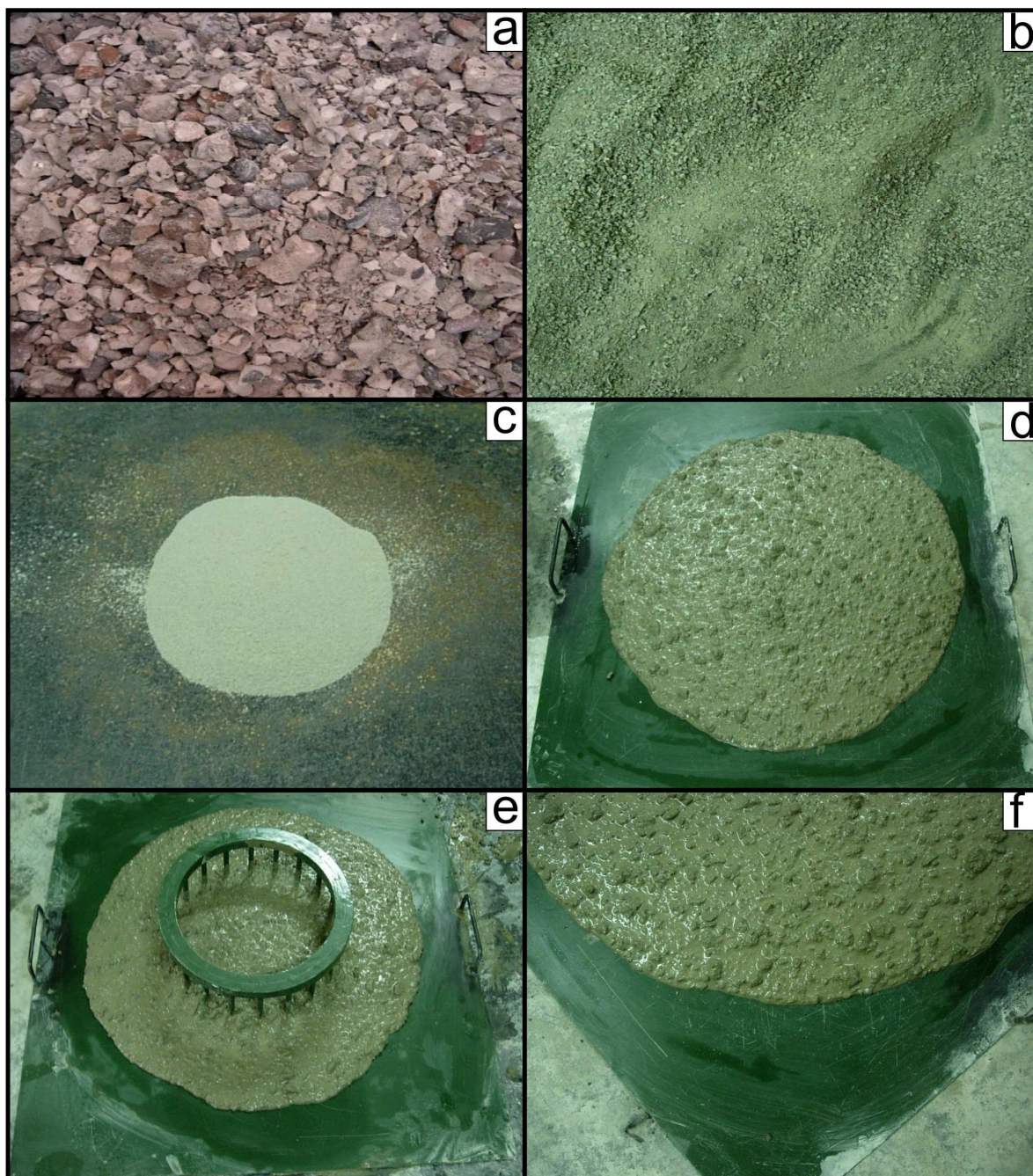


Figura 1 – Material triturado y ensayos de las mezclas en estado fresco

b. Ensayos del HAC en estado endurecido

Los resultados de los ensayos del hormigón en estado endurecido, se resumen en la Tabla 3. Los valores de resistencia a compresión corresponden al promedio de cinco determinaciones y los de tracción por compresión diametral, al promedio de

tres determinaciones. Se detallan en la misma tabla los valores de capacidad (C), velocidad de succión capilar (S) y el correspondiente coeficiente de correlación del ajuste por cuadrados mínimos (R^2).

PASTONES	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	C (g/m ²)	S (g/m ² s ^{0,5})	R ²
HAC 6	48,1	4,1	2949	4,8	0,988
HAC 8	45,6	3,8	3462	6,1	0,991
HAC 7	46,6	4,3	3333	5,5	0,989
HAC 9	47,0	3,9	3526	6,2	0,996

Tabla 3 – Resultados de los ensayos en estado endurecido

Los valores de resistencia a compresión y tracción, para las mezclas elaboradas con el aditivo S (HAC 8), presentaron una leve disminución (del orden del 5% y 7%) frente a los del hormigón de referencia (HAC 6).

Los valores de resistencia a compresión para las mezclas elaboradas con el aditivo H, fueron similares, mientras que la resistencia a tracción del pastón con inclusión de polvos disminuyó un 9 % respecto al hormigón de referencia.

En la Figura 2 se presentan las curvas del incremento de masa por unidad de área en función de la raíz cuadrada del tiempo, determinadas en el ensayo de succión capilar. Se puede apreciar que las mezclas con inclusión del agregado fino reciclado (HAC 8 y HAC 9) presentaron un leve incremento en los valores de capacidad y velocidad de succión capilar, respecto de las mezclas de referencia (HAC 6 y HAC 7), siendo la diferencia más marcada en el caso del aditivo S. Pese a la mayor absorción de agua que presentan los agregados reciclados frente a los naturales, el comportamiento en el ensayo de succión capilar resultó similar. Esto se puede atribuir a la menor relación agua/cemento efectiva de los hormigones con agregado fino reciclado frente a los hormigones con arena natural, ya que la capacidad de absorción de agua del agregado triturado es mucho mayor que el del agregado fino natural. Debido a ello, parte del agua de mezclado es absorbida por el agregado reciclado¹¹.

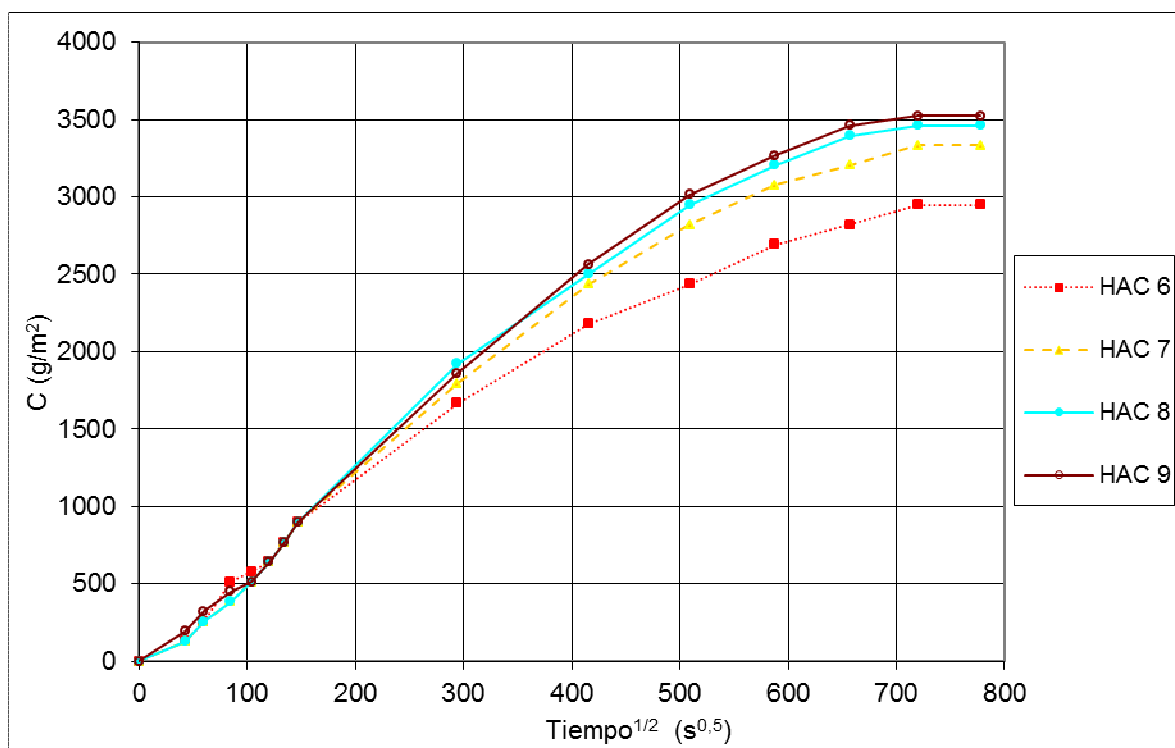


Figura 2 – Ensayo de succión capilar

c. Estudios petrográficos

En todos los hormigones estudiados, el agregado grueso natural es canto rodado en cuya composición predominan las rocas volcánicas. El agregado fino es arena natural de origen marino constituida por cuarzo, feldespatos, valvas carbonáticas, piroxenos, rocas volcánicas y graníticas y escasa cantidad de calcedonia.

El mortero se presenta en excelente estado, no se observa microfisuramiento. El contacto agregado reciclado-mortero es neto. Las cavidades de aire accidental están vacías, son abundantes y de gran tamaño, superando en algunos casos 1 mm. La pasta del HAC realizado con el aditivo S tiene mayor birrefringencia (al observarla con nicoles cruzados) que la del aditivo H y con luz paralela es más clara. Sin embargo las pastas de los hormigones con 20 % de finos son similares con ambos aditivos, pero más oscuras y densas que las que no tienen finos. Es decir, la inclusión de polvos densificó la matriz del mortero. No se observaron variaciones en la interfase agregado reciclado – mortero entre los diferentes HAC evaluados. En todos los casos es neta y muchas veces difícil de distinguir. La buena adherencia que presentan los agregados reciclados, frente al agregado natural, no se vio modificada por la inclusión de polvos.

En la Figura 3.a se observa mortero del hormigón HAC 6 en contacto neto con el agregado grueso. La Figura 3.b muestra una partícula de agregado reciclado formada únicamente, por mortero original. La interfase es homogénea y solo es posible diferenciar el mortero reciclado del que corresponde al HAC 8 porque en el

primero la pasta de cemento es más oscura. No se observaron diferencias en la microtextura entre los morteros de los HAC con 50% de agregado grueso reciclado y aquellos que además contienen 20% de polvos de molienda resultantes de la trituración de hormigón.

Las partículas de mortero reciclado muestran, en general, evidencias de carbonatación como se muestra en la Figura 3.c (HAC 8, con nicoles cruzados).

La Figura 3.d corresponde al HAC 9 (con luz paralela). Se muestran 2 partículas de agregado grueso reciclado, en contacto neto con un mortero sano y compacto.

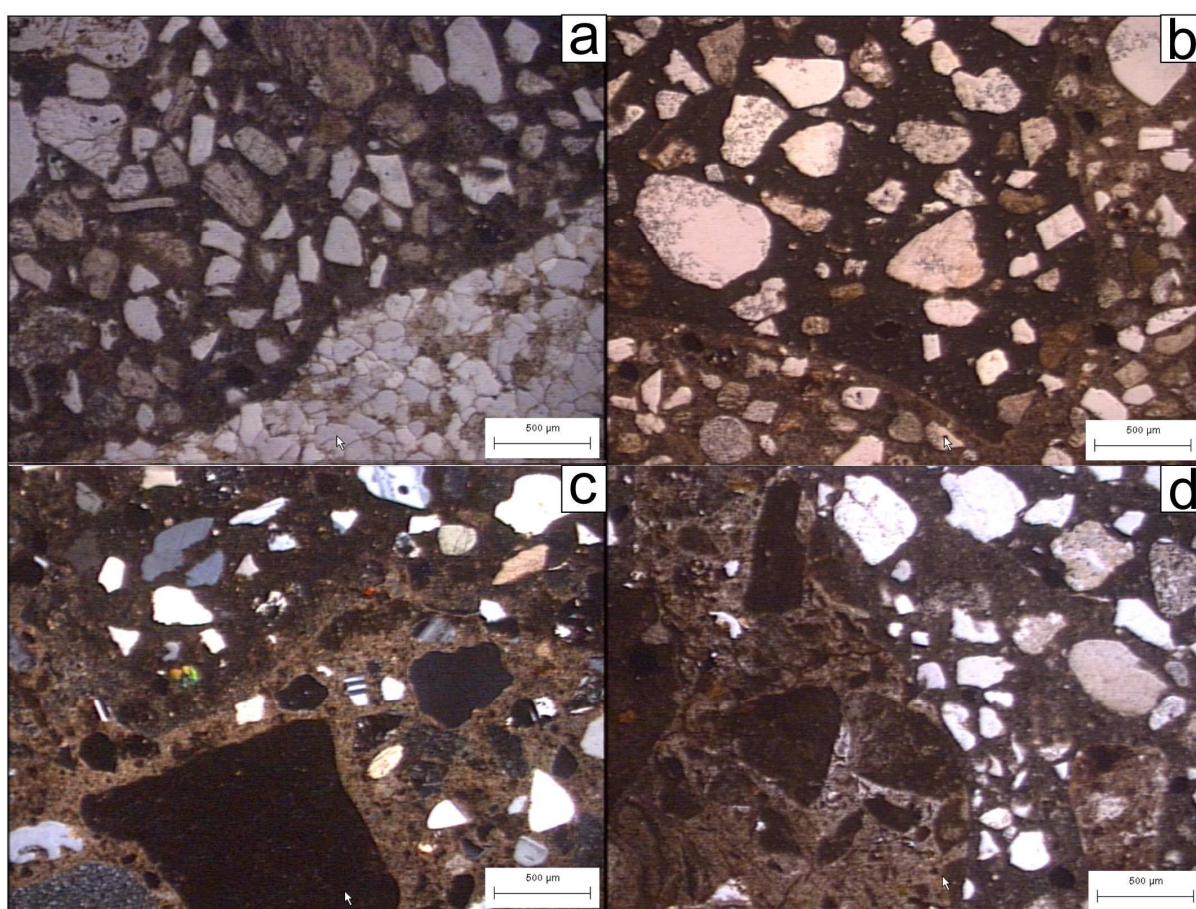


Figura 3 – Petrografía

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió el comportamiento de hormigones autocompactantes elaborados con 50% de agregado grueso reciclado y 20% de polvos de molienda resultantes de la trituración de hormigón. De los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Los dos aditivos estudiados (H y S) resultaron compatibles con el cemento utilizado proveniente de la provincia de Buenos Aires.
- La inclusión de agregado fino reciclado hace necesario el uso de mayores dosis de aditivo que en las mezclas de referencia. Fue necesario utilizar la dosis máxima propuesta por el proveedor del aditivo H para lograr un mismo ámbito de consistencia.
- Los valores de los ensayos de los pastones en estado fresco resultaron admisibles para caracterizar un HAC. En todos los casos las mezclas presentaron buen aspecto, sin signos de segregación ni exudación.
- Se verificó una leve disminución en los valores de resistencia a compresión y tracción de las mezclas del aditivo S con inclusión de polvos de trituración, frente a los del hormigón de referencia. Los valores de resistencia a compresión para las mezclas del aditivo H, resultaron similares.
- Las mezclas con inclusión del agregado fino reciclado presentaron un leve incremento en los valores de capacidad y velocidad de succión capilar, respecto de las mezclas de referencia, pese a la mayor absorción de agua que presentan los agregados reciclados frente a los naturales. Este comportamiento se puede atribuir a una menor relación agua/cemento efectiva en los hormigones reciclados y a una mejor adherencia en la zona de interfase.
- En el estudio petrográfico de las diferentes mezclas se pudo constatar que la inclusión de polvos densificó la matriz del mortero. En la zona de interfase se observó la excelente adherencia del agregado reciclado con el mortero.
- Es factible la inclusión de polvos de molienda como agregado fino reciclado, en reemplazo de un 20% del agregado natural. De esta manera se logra el aprovechamiento integral del material tratado, es decir agregado grueso, arena y polvos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Dptos. de Ingeniería y Geología de la UNS y a la CIC de la Prov. de Bs. As. por el apoyo brindado.

Referencias

1. Iglesias Oria R. "Hormigón autocompactante mejorado con aditivos químicos y uso de áridos reciclados". Universidad de Cantabria. 148 pág. 2012.
2. Hansen T., Narud H. "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate". Concrete International, vol. 5 (1), pp. 79–83. 1983.

3. Tavakoli M., Soroushian P. "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate". *Materials Journal*, ACI, pp. 182–190. 1996.
4. Poon C., Kou S., Lam L. "Use of recycled aggregates in moulded concrete bricks and blocks". *Construction and Building Materials*, vol. 16, pp. 281–9. 2002.
5. Padmini A., Ramamurthy K., Mathews M. "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*, vol. 23 (2), pp. 829–836. 2009.
6. Zega C., Villagrán-Zaccardi Y., Di Maio A. "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates". *Materials and Structures*, vol. 43 (1–2), pp. 195–202. 2010.
7. Lin Y., Tyan Y., Chang T., Chang C. "An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1373–80. 2004.
8. Kou S., Poon C. "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 622–627. 2009.
9. Kenai S., Debieb F., Assouz L. "Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregate". *Sustainable Concrete Construction*, Dundee, Scotland, pp. 383-392. 2002.
10. Evangelista L, de Brito J. "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates". *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 397–401. 2007.
11. Zega C., Di Maio A. "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements". *Waste Management*, vol. 31, pp. 2336–2340. 2011.
12. Leemann A., Münch B., Gasser P., Holzer L. "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete". *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1425–1433. 2006.
13. Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Yuan Y. "The microstructure of SCC compared with high performance concrete and traditional concrete". *Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete*, RILEM, 042, pp. 383-394. 2005.
14. Fava C., Fornasier G. "Hormigones autocompactantes". *Hormigones Especiales*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. ISBN: 987-21660-0-5. 354 pág. 2004.
15. Collepardi M., Borsoi A., Collepardi S., Troli R. "Strength, shrinkage and creep of SCC and flowing concrete". *Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidation Concrete and Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ed. By S.P. Shah, Chicago, MI, USA, vol. 2, pp. 911-919. 2005.

16. IRAM 1627. "Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 23 pág. 1997.
17. Gettu R., Izquierdo J., Gomes P., Josa A. "Development of high-strength self-compacting concrete with fly ash: a four-step experimental methodology". 27th Conference on Our world in concrete and structures. Singapore, pp. 217-224. 2002.
18. IRAM 1663. "Hormigón de cemento. Aditivos químicos". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 20 pág. 2002.
19. ASTM Standard C1611-14. "Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete". ASTM International, 6 pág. 2014.
20. ASTM C1621-09. "Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring". ASTM International, 5 pág. 2009.
21. IRAM 1602. "Hormigón de cemento pórtland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros - Método A". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 12 pág. 1988.
22. IRAM 1534. "Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y tracción por compresión diametral". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 15 pág. 2004.
23. IRAM 1546. "Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 13 pág. 2013.
24. IRAM 1658. "Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 9 pág. 1995.
25. IRAM 1871. "Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, Buenos Aires. 12 pág. 2004.
26. Ouchi M., Hibino M., Ozawa K., Okamura H. "A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete". Proceedings of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, ROC, Vol. 2, pp.1307-1312. 1998.
27. Self-Compacting Concrete European Project Group. "The European Guidelines for Self-Compacting concrete: Specifications, Production and use". 63 pág. 2005.